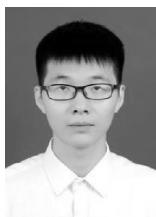


文章编号:1673-9981(2019)01-0048-05

基于 LED 光谱匹配方法的任意光谱拟合研究*

张从征^{1,2}, 许毅钦², 古志良², 郭亮¹

1. 华南师范大学信息光电子科技学院, 广东 广州 510631; 2. 广东省半导体产业技术研究院, 广东 广州 510650



摘要:为利用多个不同波段 LED 光源对目标光谱快速准确地匹配, 基于实测 LED 光谱信息建立光谱数据库, 通过求解超定方程组的非负最小二乘解, 对多个 LED 光源组合进行优化, 实现在选用 LED 个数最少时完成与目标光谱的匹配. 研究表明, 该方法可以较准确地完成与健康照明实验室中目标光谱的匹配, 选用 4、5、6、7 种 LED 光源组合进行匹配后相关指数分别为 0.957、0.984、0.985、0.986. 匹配选用 LED 种类越多, 拟合越精确, 但在实际应用中应同时考虑封装及散热等问题.

关键词:光谱匹配; 发光二极管(LED); 光谱数据库; 非负最小二乘法

中图分类号: TN201; O432.1

文献标识码: A

发光二极管(LED)作为新一代固态照明光源, 以其光效高、体积小、寿命长、节能环保、控制灵活等优点逐渐应用到照明、背光等领域, 被誉为最具应用前景的照明光源之一^[1-2]. LED 光谱作为其光度色度特性研究的基础, 近年来得到了国内外学者越来越多的关注与探究. 虽然普通白光 LED 的应用非常广泛, 但在一些特殊照明领域, 如健康照明、植物照明, 太阳光模拟器^[3]等, 单一 LED 的光谱并不能满足生产要求, 此时便需要通过多种单色 LED 进行混光来合成所需的目标光谱. 美国国家标准与技术局(NIST)最先于 2006 年研制了一款光谱可调的积分球光源^[4]. 该积分球光源内部安装有多个不同波段的 LED 光源, 通过单独控制每个 LED 的电流大小, 得到不同的光谱分布, 进而实现与目标光谱的匹配.

LED 光谱匹配算法主要基于光谱叠加原理, 多个 LED 混光后的光谱曲线为每个 LED 光谱曲线线性相加之和. 因此, 可以通过调节 LED 光源的种类、数量、驱动电流来改变最终合成的光谱, 完成对光谱的匹配. 国内外已有许多关于光谱数学模型及光谱

匹配方面的研究. 2010 年, 朱继任等^[5]采用非对称的高斯分布函数拟合单个 LED 光谱分布, 并以该数学模型为基础, 使用多个不同峰值波长的单色 LED 实现了对任意光谱的合成, 得到了较理想的拟合结果. 后来, 甘汝婷等人^[6]对匹配算法进行了改进, 他们以简单遗传算法作为光谱匹配算法, 通过求解超定方程组的非负最小二乘解, 实现了多个单色 LED 对 CIE-D65 标准光源、AM1.5 标准太阳光目标光谱的再现. 2017 年, 徐广强等人^[7]提出用光子在二维空间内联合态密度函数作为单色 LED 的光谱辐射模型, 建立 LED 光谱拟合数据库, 通过优化不同峰值波长、半高宽的单色与白光 LED 组合, 实现对目标光谱的匹配. 从以上研究我们可以看出, 目前拟合采用的光谱是由数学模型建立的, 算法比较复杂, 虽然模型在不断改进, 但与实际的光谱曲线仍存在误差, 并且对荧光粉模型拟合的精度欠佳.

本文提出一种基于实测光谱信息的 LED 光谱匹配方法, 首先对 LED 光源进行测试并建立 LED 光谱数据库, 根据匹配选用的 LED 个数, 使用 Matlab

收稿日期: 2019-01-03

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1104500); 广东省自然科学基金项目(2016A030313456)

作者简介: 张从征(1995-), 男, 河南商丘人, 硕士研究生.

通讯作者: 郭亮(1968-), 男, 广东广州人, 高级工程师, 博士, 从事激光先进制造技术等方面的研究.

编程软件列出数据库中所有的光谱组合,通过拟合计算实现对目标光谱的匹配.相比于以往研究中构造的数学模型,该方法通过对光谱实测建立数据库,算法简单,拟合结果可直接应用,更加切合实际,对健康照明、植物照明等特殊照明领域的光谱匹配有一定的实践指导意义.

1 光谱匹配技术

1.1 光谱叠加原理

在科学实验和工程应用中,曲线拟合是对目标做出预测或结论的重要手段,最小二乘法作为曲线拟合中最常用的一种回归算法,因其简单方便、运算效率高,广泛应用于众多学科的数据分析.考虑到本文的实际情况,选用最小二乘法进行拟合运算.

实际应用中的LED光源光谱往往是非常丰富的,如一些高精度的太阳光模拟器包含近百种的LED.因此,单个LED光谱不足以对目标光谱进行匹配,运用光谱匹配算法可以很好地解决这个问题.利用迭代法计算出多个LED线性叠加后的光谱与目标光谱的最小差异,得到当前使用的LED种类及对应的比例,且驱动电流与光谱相对能量近似为成正比的关系,利用计算结果便可通过调节电流实现光谱匹配^[8].由光谱叠加原理可得LED光谱合成的数学模型为:

$$\hat{S}(\lambda) = \sum k_i S_i(\lambda). \quad (1)$$

式(1)中 $\hat{S}(\lambda)$ 为最终的合成光谱, k 为比例系数, $S(\lambda)$ 为单个LED的光谱分布, i 为LED个数.

虽然实际的光谱是连续的,但由光谱仪实测的光谱为一系列与波长对应的离散点数据,在可见光范围内等间隔选取401个离散点表示一个光谱数据,假设目标光谱的数据为:

$$L(\lambda) = [y_{380}, y_{381}, y_{382}, y_{383}, \dots, y_{780}]^T. \quad (2)$$

数据库中LED数据表示为:

$$S(i) = [S_1(\lambda), S_2(\lambda), S_3(\lambda), S_4(\lambda), \dots, S_i(\lambda)]. \quad (3)$$

式(3)中 $S_i(\lambda)$ 为光谱数据库中第 i 种LED的光谱数据,假定系数矩阵 $k = [k_1, k_2, k_3, k_4, \dots, k_i]^T$,可得拟合计算公式:

$$S(i) \times k = L(\lambda). \quad (4)$$

由于匹配选用的LED个数 $i < 401$,故此方程组为超定方程组.在古典意义下此方程组是无解的,但

可以求其广义解.在实践应用中LED个数只能取非负值,即非负最小二乘解 k .

$$\|L(\lambda) - S(i)k^*\|_2 = \min \|L(\lambda) - S(i)k\|_2 (k \in R^i). \quad (5)$$

在仿真试验中,为了比较拟合光谱与目标光谱的匹配程度,引入相关指数 R^2 作为评价参数^[9],计算如(6)式:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (6)$$

式(6)中 y_i 表示目标光谱数据.对于光谱匹配而言, R^2 越接近于1,拟合光谱与目标光谱的相似程度越高,匹配的结果越好.

1.2 光谱数据库

为了满足实际应用的需求,通过对市场中LED光源进行调研,最终选用15种常用LED光源即2种白光LED和13种单色LED进行光谱测试,并将光谱信息汇总导入到程序中,建立LED光谱数据库,其光谱能量分布如图1所示.对于单色LED,其光谱数学模型可以用改进后的高斯分布函数表示,仅用多个单色LED混光后合成的白光显色性较差,应用范围受到了一定的限制;光谱曲线在波峰位置处较为尖锐,很难实现与平滑光谱曲线的匹配.本次研究中选用两种白光LED作为芯片库光谱数据,在很大程度上丰富了光谱数据库,提高了对平滑光谱曲线匹配时的相似程度.

2 仿真试验

发光二极管作为一种冷光源,光电转换效率只有50%左右,其余能量则会以发热的形式损耗,因此散热一直是LED产业面临的重大难题之一^[10].而解决该问题最简单有效的方法之一,便是减少光源封装使用的LED个数.

基于上述光谱匹配的原理,选用实验室中用于健康照明的其中一个光谱作为目标光谱.为了求出拟合光谱与目标光谱相似程度最高时对应的LED个数,根据光谱匹配选用的LED个数,使用Matlab编程软件实现对库中光谱数据的列举,通过匹配计算找出最佳的LED组合.图2为从数据库中分别选用4种、5种、6种和7种LED进行匹配的最佳结果,表1和表2分别列出了所选用LED种类及比例系数.

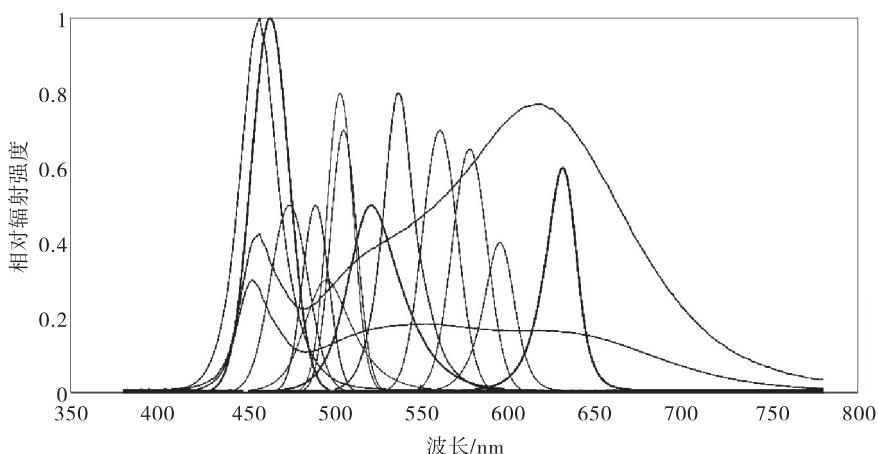


图1 数据库中LED光源的光谱辐射强度分布

Fig. 1 The spectral radiation intensity distribution of LED light source

表1 选用4种、5种LED进行匹配的最佳组合及参数

Table 1 The optimal combination and parameters of 4 and 5 LEDs selected for matching

种类	峰值波长/nm	半宽高	比例系数	相关指数	种类	峰值波长/nm	半高宽	比例系数	相关指数
1	暖白	/	0.1634		1	暖白	/	0.1533	
2	458	25	0.8135		2	458	25	0.4578	
3	522	30	0.4393	0.957	3	522	30	0.4367	0.984
4	630	24	0.5483		4	630	24	0.5585	
					5	464	24	0.3423	

表2 选用6种、7种LED进行匹配的最佳组合及参数

Table 2 The optimal combination and parameters of 6 and 7 LEDs selected for matching

种类	峰值波长/nm	半宽高	比例系数	相关指数	种类	峰值波长/nm	半高宽	比例系数	相关指数
1	暖白	/	0.1433		1	暖白	/	0.1350	
2	458	25	0.4607		2	458	25	0.4657	
3	522	30	0.4368		3	522	30	0.4674	
4	630	24	0.5728	0.985	4	630	24	0.5611	0.986
5	464	24	0.3417		5	464	24	0.3403	
6	560	20	0.0400		6	560	20	0.0523	
					7	冷白	/	0.0210	

图2(a)是从数据库中随机选4种LED进行匹配的最佳结果,由于匹配选用的LED种类较少,拟合后的光谱缺少峰值波长为460 nm的单色LED,相关指数为0.957(表1),拟合光谱与目标光谱的相似程度较差;图2(b)为选用峰值波长458,464,522,630 nm单色与暖白5种LED对目标光谱进行匹配,相比于图2(a)的4种LED,光谱更加丰富,能够实

现对蓝光的补光,提高了与目标光谱的相似程度,相关指数可以达到0.984(表1).

由表2可知,继续增加匹配选用的LED个数时,相关指数变化很小,增加的单色LED比例系数仅为0.0400,0.0210.这也就表明,新增的两种光源对目标光谱的匹配作用很小,只是补充了很小一部分的光谱曲线.虽然新增的LED光源可以稍微提高

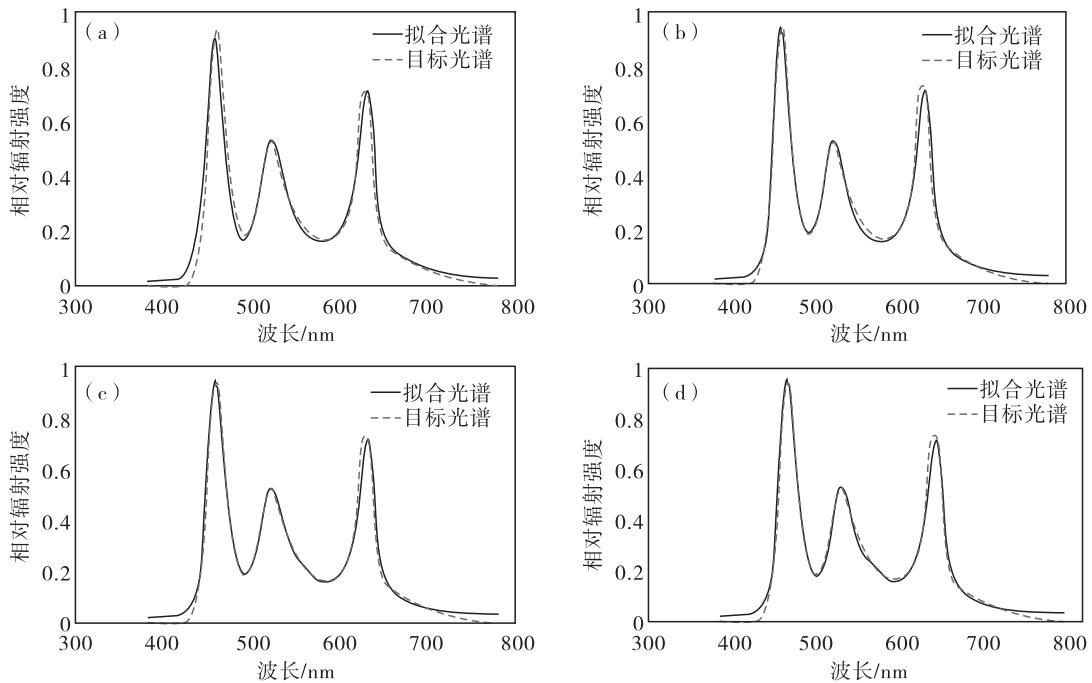


图2 不同种类LED进行匹配的最佳结果

(a) 4种;(b) 5种;(c) 6种;(d) 7种

Fig. 2 Different kinds of LED to match the best results

(a) four;(b) five;(c) six;(d) seven

匹配的精度,但是考虑到封装及散热等问题,数量较多的LED光源对封装结构有很高的要求,出光品质也会受到一定的影响.综合以上分析,精度略微提高不能弥补LED光源增加对实际应用带来的影响,因此,最少选用5种LED光源可以实现对目标光谱的匹配.

3 结论

从工程实际应用角度出发,选用15种LED进行光谱测试并建立光谱数据库.利用光谱叠加原理,使用数据库对健康照明实验室中其中一个光谱进行匹配,在分别选用4~7种LED光源时,其对应的相关指数均达到0.95以上,能较好实现与目标光谱的匹配,并且选用的LED种类越多,相关指数越大,匹配越精确.当增加的LED个数超过5种时,每增加一种LED光源,相关指数仅增加0.001.基于散热问题的考虑,可以使用5种LED光源实现对目标光谱的匹配.

参考文献:

[1] 汤坤,卓宁泽,施丰华,等. LED封装的应用研究及发展

趋势[J]. 照明工程学报,2014(1):26-30.

- [2] 张玉宝,董礼,张国英. 基于有效集算法的大功率单色LED太阳光谱模拟仿真[J]. 发光学报,2018,39(6):254-265.
- [3] 高维惜,倪凯凯,林泽文,等. LED模拟太阳光研究[J]. 照明工程学报,2015(1):80-83.
- [4] FRYC I, BROWN S W, EPELDAUER G P, et al. LED-based spectrally tunable source for radiometric, photometric, and colorimetric applications [J]. Optical Engineering, 2005, 44(11):111309.
- [5] 朱继亦,任建伟,李葆勇,等. 基于LED的光谱可调光源的光谱分布合成[J]. 发光学报,2010(6):19-25.
- [6] 甘汝婷,郭震宁,林介本. 遗传算法在LED光源光谱匹配技术中的应用[J]. 光子学报,2014,43(7):166-170.
- [7] 徐广强,于慧媛,张竞辉,等. 基于单色LED补偿白光LED技术的模拟太阳光谱研究[J]. 发光学报,2017(8):134-141.
- [8] 饶丰,葛志诚,朱金连,等. 基于LED光电参数之间关系的光效计算[J]. 江西科学,2011,29(4):424-427.
- [9] 胡友丽,袁银麟,吴浩宇,等. 光谱可调积分球光源的光谱匹配算法研究[J]. 应用光学,2014,35(3):57-63.
- [10] 郭凌曦,左敦稳,孙玉利,等. LED散热技术及其研究进展[J]. 照明工程学报,2013,24(4):64-70.

Arbitrary spectral fitting based on LED spectral matching method

ZHANG Congzheng^{1,2}, XU Yiqin², GU Zhiliang², GUO Liang¹

1. School of Information Optoelectronics Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

2. Guangdong Institute of Semiconductor Industry Technology, Guangzhou 510650, China

Abstract: In order to use LED light sources of different bands to quickly and accurately match the target spectrum, a spectral database was established based on the measured LED spectral information. By solving the non-negative least squares solution of over determined equations, the combination of multiple LED light sources was optimized to achieve the matching of the target spectrum with the minimum number of LEDs. The results show that this method can more accurately complete the matching with the target spectrum in the healthy lighting laboratory, and the correlation coefficients of 4, 5, 6 and 7 LED light source combinations after matching are 0.957, 0.984, 0.985 and 0.986, respectively. More LED types are selected for matching, the more accurate the fitting will be. However, packaging and heat dissipation should be considered simultaneously in practical applications.

Key words: spectral matching; light emitting diode (LED); spectral database; nonnegative least square method

(上接第43页)

Preparation of zirconium diboride powder by spray granulation for atmospheric plasma spraying method

LIU Yuan, WANG Xin, FENG Xiaoqiang, JIANG Shaoliang

School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

Abstract: Zirconium diboride (ZrB_2) based ultra-high temperature ceramics have wide application prospects in aerospace, electronics and nuclear industries. Particle size of synthetic ZrB_2 powders is excessively small and hard to be directly used in atmospheric plasma spraying (APS). Therefore the effects of spray-drying parameters such as solid content, binder content, inlet air temperature and feed rate and heat treatment process on the particle size distribution and morphology of the granulated zirconium diboride powder were studied to optimize the spray drying process and heat treatment method. As shown in the results, at the condition: mass fraction of slurry's solid contents is 40% ~ 45%, mass fraction of PVA binder is 0.4%, inlet air temperature is 240 ~ 270 °C, nozzle speed is 30 r/s, and peristaltic pump feed rate is 30 ~ 50 r/min, the granulated ZrB_2 powder have concentrated particle size distribution and high sphericity. The loose powder sintering method is used for heat treatment. Discharging binder at 500 °C for 1h and sintering at 1100 ~ 1500 °C for 1 h. After heat treatment, the ZrB_2 powders maintain the original spherical morphology and have a favorable density, the average particle size shrinks to about 70 μm, excellently fit the demands for atmospheric plasma spraying.

Key words: ZrB_2 ; spray-drying; heat treatment; process parameter